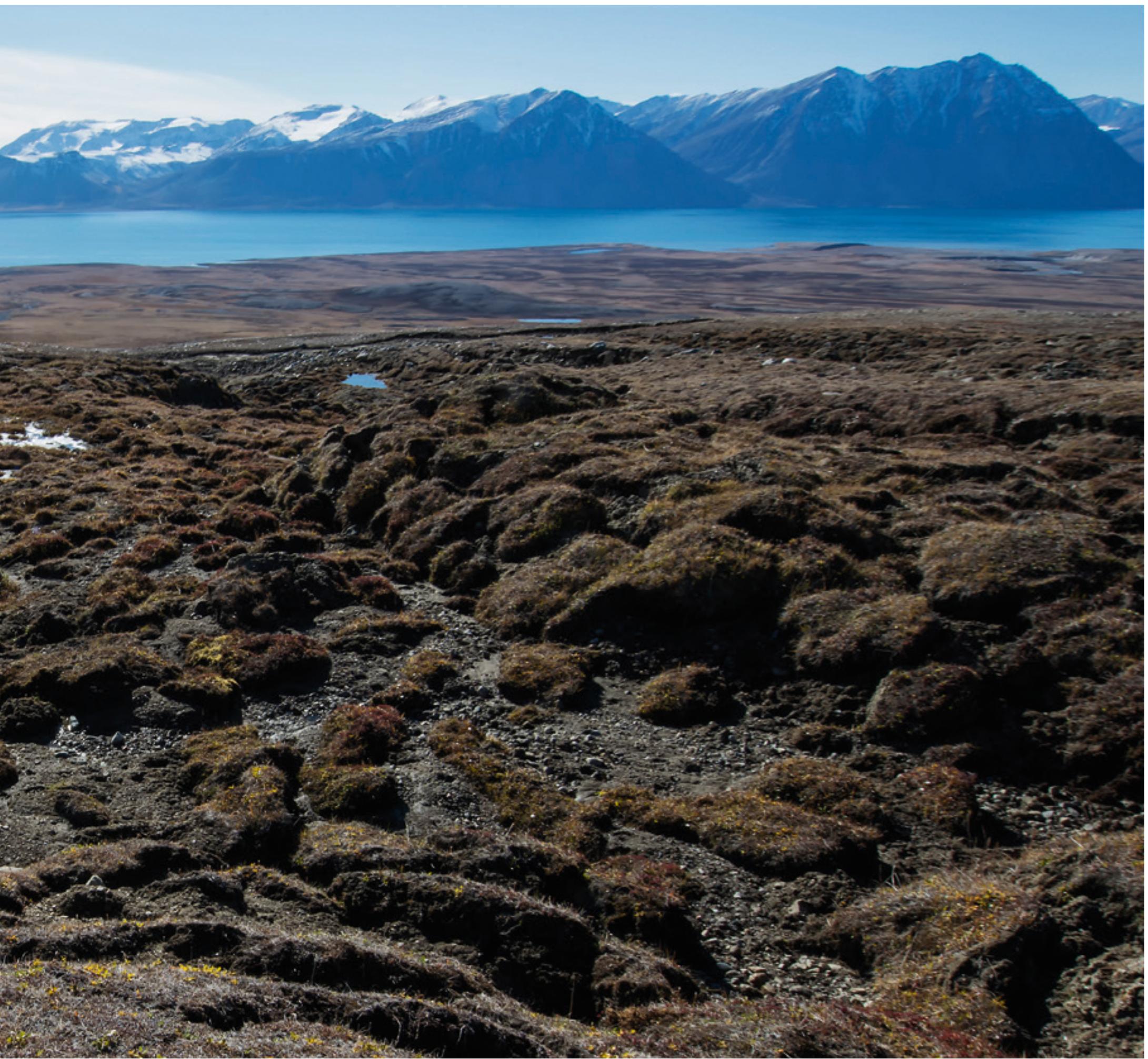




Landet der dukker op | The emerging land





August | Zackenberg

Permafrostens hemmeligheder

Permafrost er jord eller sedimenter, der mindst to år i træk er på eller under frysepunktet. Næsten 25% af land-arealet på den nordlige halvkugle er permafrost, og det samme landareal indeholder næsten halvdelen af kladens jordbundne, organiske kulstof. Hvis blot en mindre del af denne pulje af organisk stof nedbrydes af mikroorganismer og friges som en drivhusgas (kuldioxid eller metan), kan det få konsekvenser for det globale drivhusgasbudget. Omvendt ved vi, at den øverste del af permafosten indeholder gammelt kulstof, som ikke er blevet omsat i tidligere varme-perioder, fx for omkring 5000 år siden, hvor Arktis i mere end 1000 år menes at have været varmere end i dag. Et af de helt store spørgsmål er derfor, hvor hurtigt og hvor meget kulstof fra permafosten, der vil blive frigivet som drivhusgasser ved fremtidige klimaændringer?

Permafosten virker stabiliserende på en række processer i Arktis. Når permafosten tør, løber smeltevandet væk, dele af landskabet kollapser, erosionen øges og omsætningsprocesser i jordmiljøet accelereres. Den fysiske nedbrydning af landskabet har mange steder haft betydelige konsekvenser for infrastrukturen, når fx bygninger, rørledninger, veje og afdalspladser destabiliseres eller ødelægges. Af samme grund er permafostens udbredelse blevet kortlagt siden 1880'erne og landområder klassificeret efter, hvor stor en del af landskabet, som er dækket af permafrost. Her er anvendt en klassifikation, hvor områder med kontinuert permafrost betyder, at mere end 80% af et område er underlagt permafrost. Her er den årlige middellufttemperatur koldere end -5 °C, og permafosten betegnes for at være "kold" og er den mest stabile type overfor klimaændringer. Diskontinuert permafrost betyder, at 30-80% af landskabet er underlagt permafrost og knytter sig til årlige middeltemperaturer mellem -5 og -1 °C. Ved en temperatur varmere end -1 °C forekommer permafrost kun sporadisk og typisk i vådområder med et rigt indhold af organisk materiale eller i bjergområder.

Forrige sider: Landskabet kan ændre sig hurtigt og markant, når permafosten tør. Billedet viser et såkaldt tilbagegående optøningsskred, hvor en del af landskabet skrider nedad på en skråning og nærmest glider ned på grund af tyngdekraften. Derved blotlægges en stadig større del af permafosten. Processen kan på den måde være selvforstærkende og stopper typisk først efter en vinter.

The secrets of the permafrost

Permafrost is soil or sediments that have been at or below the freezing point for at least two consecutive years. Permafrost covers about 25% of the land area on the Northern Hemisphere, and the same area contains almost 50% of the global soil organic carbon. If just a minor fraction of this organic matter is decomposed by microorganisms and released as a greenhouse gas (carbon dioxide or methane), it can affect the global greenhouse gas budget. Nevertheless, we know that the upper permafrost contains old carbon, which was not decomposed in earlier warmer periods. For instance, about 5,000 years ago, the Arctic experienced a warm period lasting more than 1,000 years, which is believed to have been warmer than today. Thus, a central question is how fast and how much carbon will possibly be released from the permafrost due to future climate changes?

Permafrost stabilizes a number of processes in the Arctic. However, when it thaws, the meltwater in the soil drains away, parts of the landscape can collapse, the erosion increases and decomposition processes in the soil accelerate. This physical degradation of the landscape has had a considerable impact on infrastructure, when e.g. buildings, pipes, roads and landfills are destabilized or destroyed. Because of the danger it poses to infrastructure, the distribution of permafrost has been mapped since the 1880's, and land areas have been classified according to the extent of permafrost. To assess the extent of permafrost, a classification has been developed, where "continuous permafrost" means an extent of permafrost in more than 80% of an area and where the annual average air temperature is below -5 °C. In contrast to other types of permafrost, the continuous permafrost is characterized as "cold", and it represents the type of permafrost most resilient to climate change. "Discontinuous permafrost means an extent of permafrost in 30-80% of an area and an annual average air temperature between -1 and -5 °C. At temperatures warmer than -1 °C, permafrost only occurs sporadically and typically in organic-rich wetlands or in mountainous regions.

Previous pages: The landscape can change rapidly and markedly, when the permafrost thaws. The photo shows what is known as a retrogressive thaw slump, where parts of the landscape slide downslope due to gravity, thereby exposing a progressively larger part of the permafrost. The process thus becomes self-reinforcing and typically does not stop until after a winter.

Udbredelsen af permafrost i Grønland, kortlagt ved brug af satellitdata. Kortet viser, at alle typer permafrost findes i Grønland. Derfor er det vanskeligt at udtale sig generelt om permafrostens stabilitet og fremtidige optøning. Data fra 8-dages middelværdier i perioden 2001-2014 er brugt til at udregne en gennemsnitlig års temperatur for hver eneste kvadratkilometer i den isfrie del af Grønland (i alt knapt 350.000 pixels). Kortet er bearbejdet af Andreas Westergaard-Nielsen.

The distribution of permafrost in Greenland mapped using satellite data. All types of permafrost are found in Greenland, which makes it difficult to make general conclusions about permafrost stability and future thawing. The values in this map represent the average yearly temperature for each square kilometer in the ice-free part of Greenland (almost 350,000 pixels), derived from eight-day average values from 2001-2014. The map has been made by Andreas Westergaard-Nielsen.



Permafosten set fra oven

Permafrostens betydning for landskabets former ses tydeligt fra luften. En helt særlig måde at opleve Arktis fra luften på er ved at udstyre en gummibåd med motor og sejl, tage tilløb på en blank vandoverflade og så lette. Det giver en enestående mulighed for at opleve landskabet med vind i håret, og svæve lydløst rundt i 2-300 meters højde takket været en kyndig kaptajn ved styrepinden.

Fra luften oplever man et landskab præget af frys-tø processer. De øverste lag af landskabet tør hver sommer og kaldes aktivlaget. Under aktivlaget findes permafosten. Det man blandt andet ser fra luften er iskile polygoner i stor skala. Polygonerne dannes, fordi jorden sprækker op ved frysning. I sprækkerne samler der sig vand, som om efteråret fryser til is, og derved vokser iskilen fra år til år. Overflyvningerne i lav højde eigner sig godt til at finde repræsentative steder, hvor man kan bore efter permafrostprøver.

Permafrost seen from above

An aerial view clearly shows the effect of the permafrost on the landscape. A very special way to become airborne in the Arctic is to enter a rubber boat equipped with an engine and sails, then to accelerate crossing a lake and take off. Flying in this device gives a unique chance to experience the landscape, while gliding silently through the air 200-300 m above ground, as long as you have a practiced captain at the helm.

The upper part of the landscape is called the active layer since the layer thaws every summer. Beneath the active layer you find the permafrost. What you see from above is a landscape marked by the freeze-thaw processes, e.g. large-scale ice wedge polygons. Polygons form when the soil cracks open due to freezing. Water accumulates in the cracks and freezes in the autumn and thus the ice wedge grows each year. Flights at low altitudes are perfect for locating places suitable for permafrost sampling at representative locations.



August | Broget dal, Strindbergs Land



August | Broget dal, Strindbergs Land



I øjenhøjde med landskabet

Selv om permafosten ligger et stykke under jordoverfladen, er landskabets overflade og former præget af den og de årligt gentagne frys-tø processer i aktivlaget. Is fylder omkring 9% mere end flydende vand, og iskrystaller vokser mod den retning, som kulden kommer fra. Det betyder, at isdannelsen medfører en transport af vand, og at en linse af is kan vokse sig større og større. De kræfter, der er i spil, kan løfte jordlag, vælte træer, flytte veje og skabe imponerende ændringer i landskabet.

The landscape at eye level

Although the permafrost can be found below ground, the soil surface and other features of the landscape are clearly influenced by the permafrost and the annual freezing and thawing in the active layer. Because the ice has a volume that is around 9% larger than that of liquid water, and because ice crystals tend to grow towards the coldest areas, the formation of ice can translocate water and ice lenses grow increasingly larger. The forces of permafrost can be so large, that they can lift soil layers, bring down trees, move roads and cause impressive changes to the landscape.



August | Zackenberg

Et landskab præget af frys-tø processer. På modstående side ses kantlyng (Cassiope), der vokser mellem tuerne, og pil (Salix) i efterårsfarver, som dominerer på tuerne. I virkeligheden er der tale om polygoner i lille skala. Tuedannelse – som det ses her – har stor betydning for sneaflejninger, overladens energibalancen og stabiliteten af den underliggende permafrost. Polygonerne er cirka 70 cm i diameter og er dannet som resultat af gentagende optøning/frysning. Ovenstående billede er ligeledes polygonjorde, blot i større skala.

A landscape characterized by the freeze-thaw processes. The photo on the previous page shows Cassiope plants growing between the hummocks, while autumn colored Salix dominate the tops of the hummocks. The formation of hummocks is important to snow deposits, the energy balance of the surface and the stability of the underlying permafrost. In fact, this landscape is dominated by small-scale polygons with a diameter of approximately 70 cm. The photo above also shows polygons, but on a much larger scale.

Flydejord er et andet udbredt fænomen i landskaber med hældning. Her kan optøet jord over en frossen bund bevæge sig nedad ved hjælp af tyngdekraften med en hastighed på få millimeter om året. På 1000 år medfører det, at en jordflydningslobe med en bredde på 100 meter kan begrave et areal på 1000 m². Det er en langsom, men vigtig proces, fordi den betyder, at der mange steder i Grønland findes begravede jordoverflader med rester af planter og andet organisk stof.

En anden måde hvor en jordoverflader kan blive begravet er ved sandfygning. På grund af de kraftige vinde og det begrænsede vegetationsdække er det nemt for vinden at flytte rundt på løse sedimenter. Sedimenterne vil senere ophøbe sig på steder med læ og danne klitter.

Solifluction is another widespread phenomenon in a sloping terrain. Thawed soil on frozen subsoil moves downwards due to gravity with a speed of just a few millimeters per year. This means, that a 100 m wide solifluction lobe can bury an area of 1,000 m² within 1,000 years. It is a slow but important process because it buries soil surfaces with plant remains and other organic matter, a phenomenon seen many places in Greenland.

Soil surfaces are also buried through the deposition of wind-blown sand. The combination of strong winds and limited vegetation cover makes it easy for the wind to shift loose sediments around. The sediments will eventually deposit in sheltered locations and form dunes.



August | Zackenberg

Et landskab præget af jordflydning. Her "kravler" jorden afsted, og med tiden vil den udflydende jord begrave den underliggende jordoverflade, som i dag er dækket af blandt andet kantlyng. Ved gentagne opmålinger med års mellemrum kan hastigheden af jordflydningen bestemmes. Hastigheden er afhængig af terrænets hældning og sammensætningen af det øverste jordlag.

A landscape affected by solifluction. The soil crawls downwards and over time, the solifluction soils will bury the underlying soil surface, which is covered by plants such as Cassiope. Through repeated measurements with frequencies of several years, the rate of the solifluction can be determined. The rate depends on the slope and the type of topsoil.

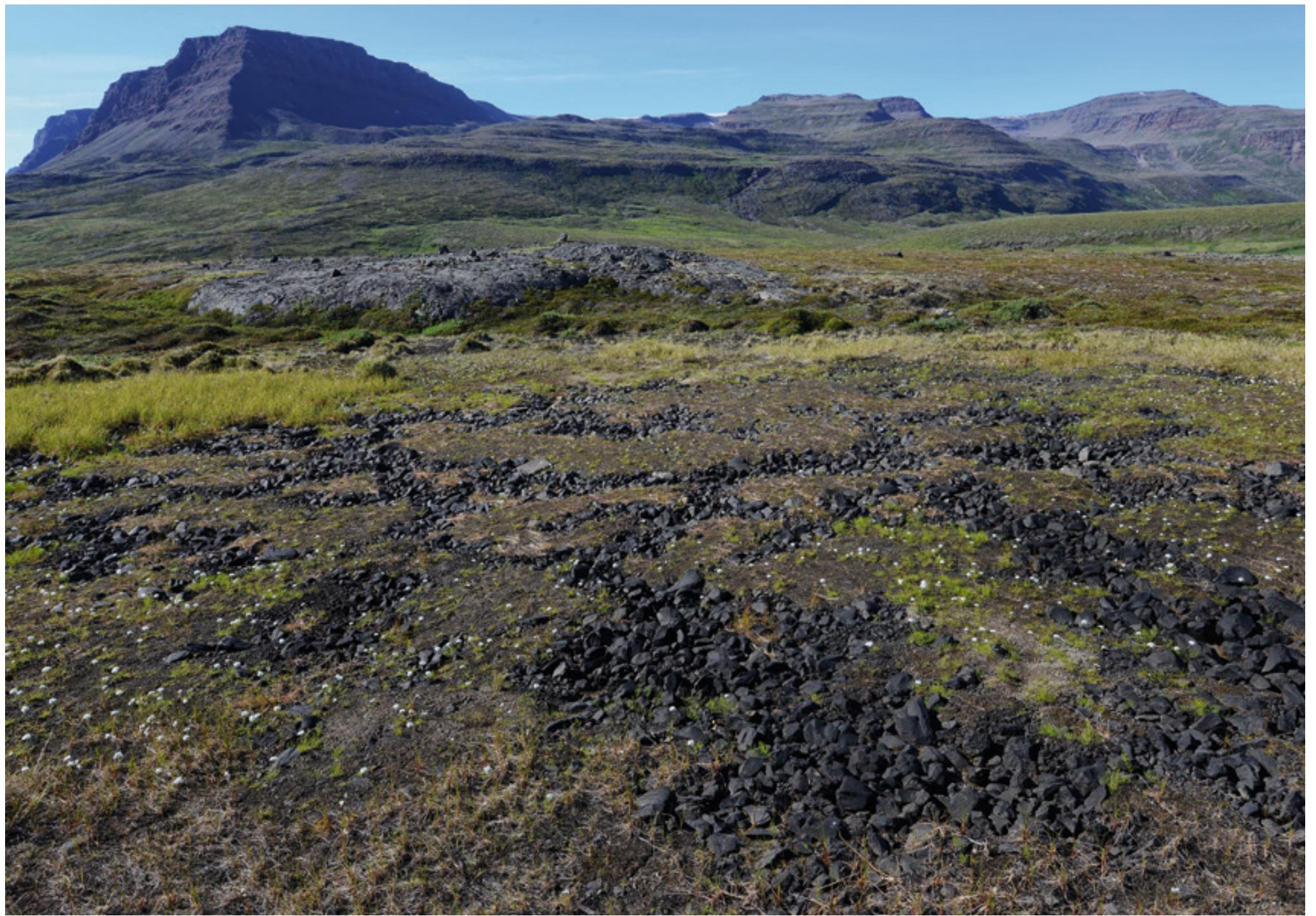


August | Zackenberg

Et landskab præget af sandfygning og små klitter, som begraver den tidligere jordoverflade. Samme sandfygning sandblæser sten, der ligger eksponeret, så de bliver facetslebne.

A landscape characterized by wind-blown sand and small dunes burying the former soil surface. Exposed stones are sandblasted to a faceted shape.





July | Disko

Her er landskabet frit eksponeret for vind og vejr, og de årlige frys-tø processer har dannet sorterede stencirkler. Sådanne sorteringsprocesser kan både danne næsten perfekte cirkler og irregulære former bestående af store klippestykker.

A landscape exposed to wind and weather. Here sorted stone circles are formed by the annual freeze-thaw processes. Such sorting processes create both almost perfectly rounded circles and irregular forms consisting of large rock fragments.

I lavlandet samles vand fra omgivelserne. Ved frysning kan der dannes små lave forhøjninger, som kaldes palse, og som har en permanent kerne af is. Palse findes typisk i områder med diskontinuert permafrost og især i lavbundsområder med meget vand.

Billedet til højre viser en kerne af is, som er dannet og vokset adskilt fra jorden (segregeret is). Isen fremstår som næsten ren is. Iskernen er her naturligt blotlagt, og spaden er placeret for at angive størrelsesordenen. En palsa vil typisk vokse i højden i takt med, at kernen af is vokser. Kernen er beskyttet mod smelting af den jord og tørv, som ligger oven på. På et tidspunkt kan vegetationen ovenpå ikke holde sammen længere, og iskernen blottes. Så smelter kernen hurtigt, og palsen falder sammen. Det er grunden til de mange huller i landskabet og det viser, hvor omskifteligt landskabet er.

Water from the surroundings accumulates in the lowlands, where small elevations are formed when the water freezes. These are palsas, with a permanent core of ice and typically found within areas with discontinuous permafrost, and especially in wet lowlands.

The photo to the right shows a core of segregated ice, formed and grown separated from the soil. The ice is almost pure, containing almost no soil particles. This specific ice core is naturally exposed; the spade is only on the photo for scale. A palsa typically grows in size as the core of ice expands. The core is protected from melting by the overlying soil and peat, but at some point, the vegetation no longer holds, and the ice core is laid bare. Now, the ice core quickly melts and the palsa collapses. This is the reason for the many smaller depressions or holes in the landscape, and it illustrates the changeable character of the landscape.



July | Disko

Permafrostboringer

Der er mange måder at udtagte permafrostprøver på. Som regel anvendes boremaskiner eller en borerig afhængigt af hvilken dybde, man ønsker at bore til, og hvor intakte prøver, man vil udtagte. Prøverne, der omtales her, er i de fleste tilfælde udtaget fra de øverste 2-4 meter af permafosten og enkelte ned til 20 meters dybde. Zonen i de øverste 2-4 meter er mest utsat for temperatursvingninger og vil ved en optøning kunne frigive drivhusgasser.

Det er vigtigt, at prøverne forbliver frosne og intakte lige fra indsamlingen, til de skal analyseres i laboratoriet. Derfor undgår man vand og kemikalier ved borearbejdet, da disse kan optø eller ødelægge prøver. Det betyder omvendt, at det tager længere tid at bore. Borehovedet er besat med diamanter og kan bore i klipper om nødvendigt. Friktionsvarmen mellem borehovedet og permafosten sørger for, at borehovedet ikke fryser fast. Det er et stort problem, hvis det alligevel sker, fordi det kan betyde, at borehovedet og tilhørende forlængerrør med prøve må efterlades i jorden. Friktionen medfører samtidig, at der dannes mudder. Boremudderet er en forudsætning for at kunne bore, men udgør samtidig en risiko for at forurene det yderste lag af kernen.



Permafrostboringer: Den store borerig (foto på modstående side) blev anvendt i Zackenberg og ved Station Nord i Nordøstgrønland i 2012 og 2014. Den håndholdte boremaskine (foto ovenstående) er brugt mange steder i Grønland, og den er velegnet til at tage kerneprøver i de øverste 2-4 m. Til højre ses en kerne som lige er kommet op af borehullet.

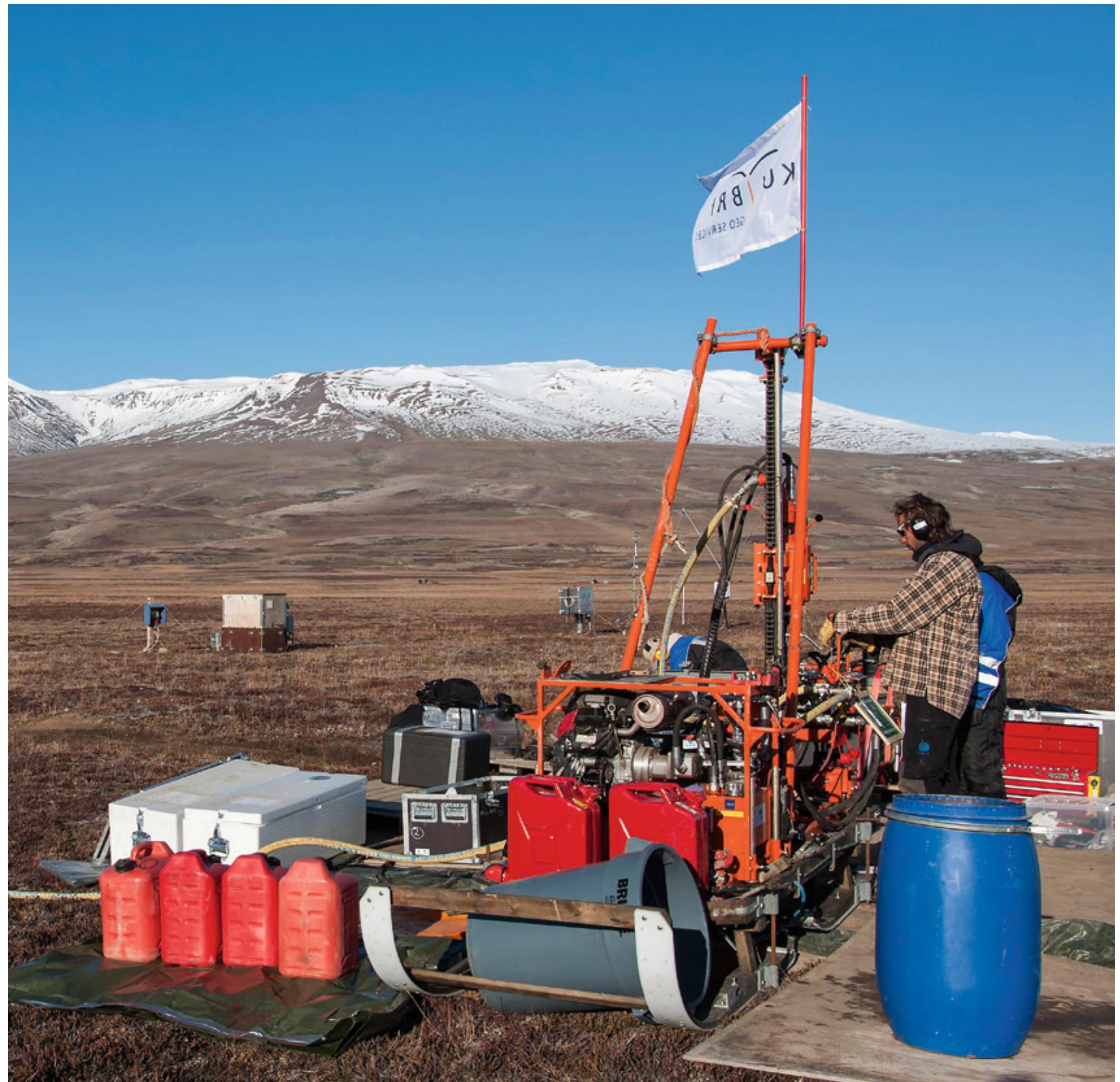
Drilling in the permafrost

Permafrost can be sampled in many ways, usually by handheld drills or drill rigs, depending on the desired depth and how intact the samples should be. The samples described here have mainly been collected from a depth of 2-4 meters, besides a few cores collected from a depth of up to 20 meters. The top 2-4 meters of the permafrost is the zone most sensitive to climate changes and thus the potential to release greenhouse gases upon thawing.

It is important that samples remain frozen and intact, until they reach the laboratory. Using water or chemicals during drilling could melt or destroy the samples, so the drilling is done without these, even though this delays the sampling. The drill head is fitted with diamonds and could drill through shear rock, if necessary. The frictional heat between the drill head and the permafrost prevents the drill head from freezing in the permafrost. Should this happen after all, it is problematic, because then the drill head, extension tubes and the permafrost sample might have to be abandoned in the ground. The friction also creates drilling mud, which is a necessity for the drilling, but also poses a risk of contamination of the outer part of the core.



Permafrost drilling: The large drill rig (photo on next page) was used in Zackenberg and at Station Nord in Northeast Greenland in 2012 and 2014. The handheld drill (left side photo) has been used all over Greenland, and it is suitable for drilling within the top 2-4 m. The photo to the right shows a newly drilled core.





Permafosten overrasker

Det er spændende, hver gang en borekerne kommer op i dagens lys. I følten pakkes kernerne dog hurtigt væk. Først senere i et fryselaboratorium undersøges og beskrives kernerne detaljeret. Mange kerner skæres op på langs for at få et overblik over fx isindholdet, og hvordan is og sedimenter er fordelt mellem hinanden. Arbejdet med kernerne er fyldt med overraskelser: prøverne kan lugte mere eller mindre godt, pludselig kan der dukke perler op fra tidligere eskimo-kulturer (se "Den frosne fortid"), planterester eller en lille rest af en insektvinge. Det skyldes, at hovedparten af det, som i dag er det øverste lag af permafosten, er tidligere jordoverflader, der nu er begravet i sedimentet.

Alle kerner fotograferes for at registrere det gennemsnitlige isindhold og fordelingen af is. Cryostratigrafi er videnskaben, der tager udgangspunkt i fordelingen af is i permafosten med henblik på at beskrive permafostens dannelse. Såfremt områder bliver isfrie, hvilket er sket mange steder i Grønland, sker frysning fra oven og permafosten "vokser" nedad (såkaldt epigenetisk permafrost). I områder, hvor der sker en pålejring af sedimenter (vand- eller vindaflejet eller tørvedannelse), vil permafosten følge med og "vokse" op i nyaflejede sedimenter (såkaldt syngenetisk permafrost).

The surprises of the permafrost

Every time a core comes to the surface in the field, it is exciting. However, the cores must be wrapped up for preservation as fast as possible. Eventually, in a laboratory that is sufficiently cold, the cores are investigated and described in detail. The cores are frequently cut up lengthwise to get a general view of e.g. the ice content or the distribution of ice and sediments. Working with the cores is full of surprises: the samples can be smelly, contain beads from former Inuit-cultures (see "The frozen past"), plant remains or perhaps the remnant of an insect wing. The majority of the upper permafrost layers are former soil surfaces, now buried in sediment and part of the permafrost.

All cores are photographed for the registration of average ice content and distribution, with the aim of describing the formation of the permafrost. This scientific discipline is called cryostratigraphy. If areas become ice-free, which has happened in many areas in Greenland, the cold temperatures penetrate the surface, and the permafrost will grow downwards to form so-called epigenetic permafrost. In areas where sediments are deposited (by water, wind or through peat formation) the permafrost surface moves up into the new deposits and forms so-called syngenetic permafrost.



Permafrostkerner er overraskende forskellige. Det skyldes, at permafrost dannes i forskellige sedimenter og under forskellige betingelser. Stort billede på modstående side viser en massiv linse af is med stort indhold af luftbobler. Små billeder viser (A): lenticular – små regulære islinsler i finkornet sediment, som er typisk for syngenetisk permafrost. (B): en typisk organisk kerne med tydelig struktur af planterester og (C): et meget isholdt organisk lag. Den hvide skala svarer til en cm.

Cores of permafrost are surprisingly different, since permafrost forms in a variety of sediments and conditions. The large photo on the previous page shows a solid ice lens filled with air bubbles. The small photos show (A): lenticular ice – small regular ice lenses in fine grained sediment, typical of syngenetic permafrost. (B): a typical organic core showing a clear structure from plant remains. (C): an organic layer high in ice-content. The white bar equals one centimeter.

Permafrosten under mikroskop

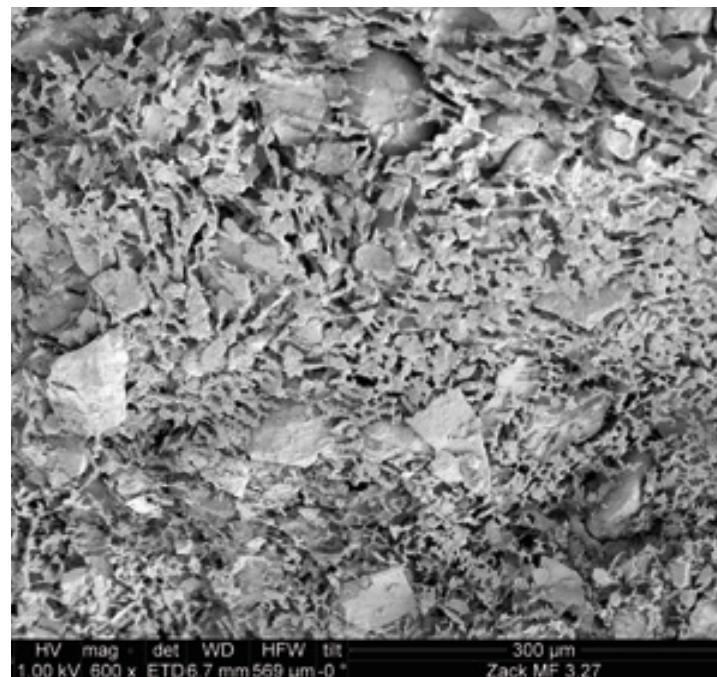
Skal man undersøge strukturen i permafrosten mere detaljeret, er det nødvendigt at bruge udstyr, hvor permafrosten ikke tør under arbejdet. Til det formål kan man bruge et særligt scanningelektronmikroskop (CryoSEM), hvor det er muligt at arbejde med prøver i et kontrolleret miljø under -15 °C. Billederne på denne side viser isens uensartede og fragmenterede fordeling i forhold til sandkornene i en permafrostprøve.



Bemærk forskellen i målestokken. De to ovenstående billeder er samme prøve, men er i forskellig forstørrelse. Det afgørende i at undersøge permafrostprøver ved forskellige forstørrelser er at opleve, at den ellers til-syneladende homogene permafrostprøve, man har i hånden, nu bliver et frossent bjerglandskab. Den uensartede fordeling af is kan være med til at forklare, hvorfor permafrost kan have meget forskellige egenskaber afhængig af isdannelsen, hvilket har betydning for fx transportegenskaber af luft og forekomsten af lommer, hvor mikroorganismer vil kunne overleve.

The permafrost under microscope

When a more detailed examination of the permafrost structure is necessary, the equipment used must be able to keep the cores frozen. For this purpose, we use a CryoSEM, a special scanning electron microscope, making it possible to work at controlled temperatures below -15 °C. The photos on this page show the uneven and fragmented distribution of ice and sand grain in a permafrost core.



Notice the difference in scale. The two photos above are from the same sample, but in different resolutions. Observing the same sample in different resolutions can change an otherwise homogeneous permafrost sample into a frozen mountainous landscape. The reason for doing so is to find explanations for why permafrost can have such different properties, depending on the formation of ice, which have influence on e.g. the transport of air and the presence of pockets in which microorganisms can survive.

Den levende permafrost

Permafrost er som en dybfryser. Temperaturen er ret konstant, og det har vist sig, at frø fra planter og mikroorganismer ikke bare undgår nedbrydning, men rent faktisk overlever mange år i permafrosten. Frosne frø er blevet optøet og er begyndt at spire. Tilsvarende viser det sig, at kerner af permafrost, der er indsamlet og efterfølgende optøet, typisk begynder at producere kuldioxid i løbet af ganske få dage. Det er fordi mikroorganismer fra permafrosten er vågnet op til dåd og ikke blot vokser i antal, men også er i stand til at nedbryde fx rester af organisk stof i permafrosten. Mikroorganismerne omfatter, hvad man traditionelt kalder bakterier, men også svampe og archaea. Archaea er en interessant gruppe af encellede mikroorganismer, der blandt andet er kendt for at kunne producere metan. Kombinationen af bakterier og svampe er vigtig, fordi bakterier typisk nedbryder de let nedbrydelige kulstofferbindelser i organisk stof, mens svampe tager sig af de mere svært nedbrydelige kulstofferbindelser.

Et gram permafrost indeholder typisk mere end en million bakterier og en overraskende mangfoldighed af mikroorganismer. På mange måder minder diversiteten om sammensætningen af mikroorganismer i jordlag fra fx Danmark. Denne store mikrobiologiske diversitet betyder, at afhængig af under hvilke forhold permafrosten tør, vil visse grupper af mikroorganismer typisk drage nytte af de nye vilkår på bekostning af andre. Ny forskning viser, at permafrostens sammensætning af bakterier ændres overraskende hurtigt (inden for dage til uger) efter optøning. Hvis permafrostkernen vandmættes, vil nogle typer af bakterier begynde at danne metan under fraværet af ilt, mens en dræning af smeltevandet fra samme prøve vil medføre, at ilt trænger ind i prøven, hvorved en optøning vil medføre, at andre typer af bakterier kommer til at dominere og producere fx mere kuldioxid.

The living permafrost

Permafrost is like a freezer. The temperature is kept relatively constant, and seeds and microorganisms appear to avoid decomposition and are able to survive for many years in the permafrost. Frozen seeds can thaw and start to germinate. Similarly, frozen permafrost cores can be thawed and subsequently produce carbon dioxide, typically within just a few days, when the microorganisms wake up and multiply themselves while decomposing remains of organic matter in the permafrost. Microorganisms include what is traditionally called bacteria, but also fungi and archaea. Archaea are an interesting group of single-celled organisms, among others known to produce methane. The combination of bacteria and fungi is important since bacteria typically decompose the most easily decomposable carbon compounds of the organic matter, while fungi deal with the more persistent carbon compounds.

One gram of permafrost typically holds more than one million bacteria and a surprising diversity of microorganisms, a diversity which resembles that of typical soil layers from e.g. Denmark. This variety means that, dependent on the conditions under which the permafrost thaws, some groups of microorganisms will flourish at the expense of others. New research shows that the bacterial composition of permafrost changes surprisingly fast (within days or weeks) after thawing. If a thawed core of permafrost is saturated with water, certain bacteria start to produce methane anaerobically, while draining water from the same core can cause oxygen to enter the sample, and thus other bacteria can begin to dominate and produce e.g. carbon dioxide instead.



August | Zackenberg

For at kunne anvende permafrostkerner til studier af mikrobiel aktivitet og DNA er en korrekt prøvehåndtering helt afgørende. Prøver skal udtages og bevares steril, og arvematerialet skal ekstraheres så hurtigt som muligt. Hvor det er muligt, udføres dette arbejde i feltlaboratorier.

Correct handling of samples is crucial for studies of microbial presence and activity in permafrost. Cores must be sampled and kept sterile, and genetic material must be extracted as quickly as possible. If possible, it should be done in a field laboratory.

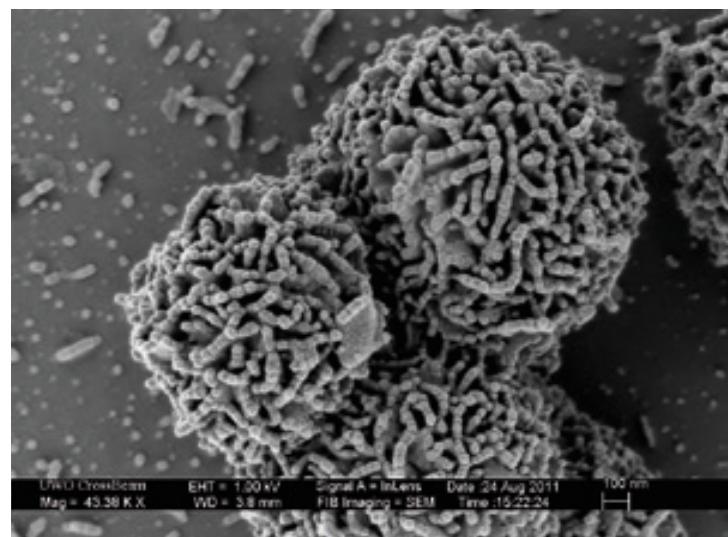
Nogle bakterier overlever bedre end andre. Når man kan finde fx *Firmicutes*-bakterier i permafosten, er det ikke overraskende. Denne gruppe af bakterier kan gå i dvale ved at indkapsle sig selv og på den måde overleve flere tusind år. Det er interessant, fordi det betyder, at meget gamle bakterier kan genaktivieres ved en optøning. I Nordgrønland er det muligt, at isfrie forhold har eksisteret lokalt, fx ved Kap København-formationen. Her blev sedimenter aflejet i et delta for mere end 2 millioner år siden og har med stor sandsynlighed været frosset lige siden. Fund af DNA viser rester fra en skov, der engang dækkede den del af Grønland. DNA ville næppe have overlevet denne lange periode, hvis lagene havde været optøet. De samme lag fra Kap København-formationen viser sig at kunne producere kuldioxid – de er altså fulde af liv, der har overlevet. Disse prøver er taget under ekstreme og sterile forhold og kan således rumme liv, som vil række ved de kendte grænser for, hvor lang tid bakterier kan overleve i permafrost.

Some bacteria are stronger survivors than others. E.g. finding *Firmicutes*-bacteria in permafrost is not a surprise. This group of bacteria encapsulates itself and goes dormant for thousands of years. This is interesting because it means that very old bacteria can be reinvigorated when the permafrost thaws. In North Greenland ice-free conditions have possibly existed locally, e.g. at the Kap København-formation. At this location, sediments were deposited in a delta more than 2 million years ago and have likely been frozen ever since. DNA samples found here suggest that some of the remnants represent a forest which once covered that part of Greenland. This DNA would hardly have survived this long period, had the sediments been thawed. The same layers from the Kap København-formation are shown to be able to produce carbon dioxide – they are full of life that has survived. These samples have been taken under extreme and sterile conditions, and the life they contain, may push the known limits for how long bacteria can survive in permafrost.

At leve eller bare overleve

Et interessant spørgsmål er, om permafrostens mikroorganismer er i stand til at leve i den frosne jord. At leve i den forstand betyder at kunne vokse og at kunne reproducere sig selv. For eksempel er bakterien *Planococcus halocryophilus* for nyligt blevet isoleret fra permafrost. I laboratoriet er det blevet påvist, at bakterien kan vokse og dele sig ved -15°C , så svaret er entydigt ja – nogle mikroorganismer er i stand til at leve i den frosne jord. Det er sandsynligt, at sådanne bakteriers overlevelse og vækst knytter sig til små lommer i permafosten. Størrelsesordenen på disse lommer kan være på nanometer skala. Et andet spørgsmål er dog fortsat ubesvaret: hvilken miljømæssig betydning har det?

Når isen dannes i permafosten, sker det overvejende som rene iskrystaller. De opløste ioner opkoncentreres derimod i den væske, som fryser til allersidst. Derved dannes små lommer med meget høje koncentrationer af salte. Det sænker frysepunktet betragteligt, og gør det muligt for lommerne i permafosten at indeholde flydende vand selv ved lave temperaturer. Sådan en lomme er et eksempel på et mikromiljø, som kan understøtte mikrobielt liv i permafosten. Dertil kommer, at mikroorganismer har mange forskellige måder at tilpasse sig livet i den frosne jord. Nogle er i stand til at ændre cellemembranens gennemtrængelighed for derved at kunne vedligeholde aktivitet henover cellemembranen ved minusgrader. Andre kuldeaktive mikroorganismer producerer enzymer, der er specialdesignet til en lav temperatur, mens en tredje gruppe producerer antifrost-proteiner, som hæmmer dannelsen af iskrystaller i deres celler.



To live or just to survive

An interesting question is, whether permafrost microorganisms are capable of living in the frozen soil? Living means the ability to grow and reproduce. An example could be the bacterium *Planococcus halocryophilus*, which has recently been isolated from the permafrost. In the laboratory, it has been shown that the bacterium can grow and divide itself at -15°C , so the answer is an unambiguous yes – some microorganisms are able to live in frozen soil. However, another question remains unanswered: what is their environmental significance? The survival of such bacteria is most likely linked to little pockets, perhaps of nanometer scale, in the permafrost.

Ice most frequently forms in the permafrost as pure ice crystals. The dissolved ions become more and more concentrated in the last remaining still unfrozen fluid. Thereby small pockets holding very high concentrations of dissolved salts are created. The high content of salts lowers the freezing point considerably and enables the pockets in the permafrost to hold liquid water even at very low temperatures, thus creating a microsite able to support microbial life in the permafrost. Additionally, microorganisms have adapted to life in the frozen soil in various ways. Some are able to change the permeability of cell membranes and this enables activity across the cell membrane at below-zero temperatures. Other microorganisms produce enzymes designed for cold conditions, whereas a third group produces anti-freeze proteins limiting the formation of ice crystals in their cell interiors.

Her ses bakterien *Planococcus halocryophilus*, der er i stand til at vokse ved -15°C . Bakterien ændrer sin overflade fra glat til nubret, når den lever ved meget lave temperaturer. Billedet er trykt med tilladelse af Nadia Mykytczuk og Lyle White.

This photo shows the bacterium *Planococcus halocryophilus*, which is capable of growing at -15°C . The bacterium changes its surface from smooth to granulate when living at very low temperatures. Photo printed with permission from Nadia Mykytczuk and Lyle White.



August | Zackenberg

Permafrostens kulstoflager

Indlandsisen i Grønland isolerer så godt mod vinterkulden, at Jordens egen varme sørger for, at der ikke findes permafrost under Indlandsisen. Permafrost findes altså kun i de isfrie områder og er derfor i Grønland dannet, da isen langs kysten smeltede tilbage efter sidste istid for ca. 10.000 år siden. Kun enkelte steder, som fx ved Kap København, har områder formentlig været isfri gennem meget lang tid og permafrosten er derfor gammel.

Siden sidste istid er hovedparten af permafrosten i Grønland vokset i tykkelse og har nu mange steder en tykkelse på 10 til mere end 400 m. På Disko i Vestgrønland er permafrostens nedre grænse blevet målt til 350 m og ved Thule i Nordgrønland til 450 m under jordoverfladen. Den nedre grænse af permafrosten er i høj grad bestemt af geotermi, som er varmeenergi fra Jordens indre. Varmeenergien er en rest af den primære varme fra Jordens dannelse og henfald af radioaktive isotoper. Den varmeenergi, der når jordoverfladen, måles som produktet af den geotermiske gradient og varmeledningsevnen af bjergarterne på stedet.

Nær Indlandsisen ses flere steder en tilbagesmelting af isen, og her dannes ny permafrost. Netop her indvandrer pionerplanter hurtigt og sætter gang i en jordbundsudvikling i løbet af få år. Nedbrydningen af plantemateriale er langsommere end planteproduktionen i vækstsæsonen på grund af de generelt kolde forhold. Det er grunden til, at kolde arktiske jorde er karakteriseret ved en ophobning af kulstof. Da landskaberne i Grønland er forholdsvis unge, er mængderne af organisk stof, og dermed kulstof, dog begrænsede i forhold til meget ældre landskaber som i fx Sibirien.

Modstående side: Den øverste isholdige permafrost er fritlagt og sammensætningen af sedimenter, is og luftbobler ses tydligt. Den sidste komponent, mikroorganismerne, er ikke synlig, men afgørende for at forstå konsekvenserne af, at permafrosten tør.

The carbon stock in the permafrost

The Greenland Ice Sheet is such an efficient insulator against the cold of winter that the heat from the Earth prevents the formation of permafrost below the ice. Thus, permafrost is only found in ice-free areas and was formed in Greenland when the ice retreated from the coastal areas after the most recent ice age about 10,000 years ago. Only a few places, like Kap København, have presumably been ice-free throughout a long time period and therefore hold old permafrost.

Since the last ice age, the majority of permafrost in Greenland has grown to a thickness of 10 to more than 400 m below the soil surface. On Disko in West Greenland, the base of the permafrost has been measured at 350 m depth, and at Thule in North Greenland at 450 m depth. The lower boundary of the permafrost is predominantly set by the geothermal heat originating from the core of the Earth. This heat is a leftover from the formation of the Earth and the decay of radioactive isotopes. The geothermal heat that reaches the soil surface is a product of the geothermal gradient and the thermal conductivity of the local rocks.

Near the rim of the Ice Sheet, the glacier ice has retreated in several places, and new permafrost is formed. In such places, pioneer plants quickly begin to grow and to initiate a soil development in just a few years. Due to the cold conditions, the decomposition of plant material is slower than the plant production. This is the reason for the accumulation of carbon, which is so characteristic of arctic soils. The landscapes in Greenland are relatively young and the amount of organic matter, and thus carbon, is therefore limited compared to much older landscapes, such as those in e.g. Siberia.

Previous page: The upper ice-rich permafrost is exposed and the composition of sediments, ice and air bubbles is clearly seen. The last component, microorganisms, is not visible, but crucial to the understanding of the consequences of the thawing permafrost.

Hvor hurtigt tør permafosten?

Det er vanskeligt at måle præcist, hvor hurtigt permafosten tør. En indirekte metode er at måle aktivlagets tykkelse. Det gør man ved at presse et jernspyd ned gennem det optøede jordlag sidst på sommeren, ned til den øvre grænse for permafosten. Det mål sammenligner man med tidligere års målinger. Hvis den maksimale dybde øges år efter år, skyldes det, at toppen af permafosten tør. Forskere samler målinger af den maksimale optøning, målt sidst på sommeren hvert år, i det fælles forskningsnetværk CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring). Et intensivt CALM måleprogram blev påbegyndt i Zackenberg (Nordøstgrønland) i 1996, og resultaterne viser en stigning af den maksimale tykkelse af aktivlaget på mere end 1 cm per år; hurtigst på den tørre tundra og langsommere i våde kær-områder. Disse målinger foretages på forholdsvis stabile landskabsformer og vidner her om en gradvis optøning år efter år. Desværre findes der ikke målinger af permafostens dybde fra 1920-1930'erne, hvor Arktis sidst gennemgik en varm periode.

Isindholdet er helt afgørende for, hvor hurtigt permafosten vil kunne tø i fremtiden, og hvilken effekt en optøning har på det omgivende landskab. Frossent, tørt sand med lavt isindhold kræver mindre energi for at tø og kan være stabilt både i frossen og optøet tilstand. Den isholdige permafrost, som ofte findes i toppen af permafosten, kræver derimod mere energi for at tø, fordi varmekapaciteten for is er større end for luft. Smeltevandet fra den isholdige permafrost fylder mindre end den oprindelige is, og en optøning medfører derfor en øjeblikkelig destabilisering af jordmiljøet, som forøges betydeligt, hvis smeltevandet drænes væk. Isindholdet kan udgøre mere end 50% af permafosten og i enkelte lag udgøre 100%, fordi segregeret is har samlet sig i store islinsler.

How fast is the permafrost thawing?

It is difficult to measure the precise rate of the thawing of permafrost. An indirect method is to measure the depth of the active layer. This is done by pressing an iron spear through the thawed soil and sediments to the upper surface of the permafrost. This measure is compared to measurements of earlier years. If the maximum depth increases year after year, it means the top of the permafrost is thawing. Researchers gather annual measurements of "late summer maximum thaw depth" in the common research network CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring). An intensive CALM measuring program was started in Zackenberg in Northeast Greenland in 1996, and the results show an increase in the maximum active layer depth of more than 1 cm per year, with a faster increase on the dry tundra and a slower increase in the wet fens. These measurements have been made in relatively stable parts of the landscape and show a gradual thawing year after year. Unfortunately, there are no measurements of the permafrost depth from the 1920-1930's, which is the most recent warm period in the Arctic.

The ice content is crucial to the thaw rate and to the environmental impact of the thawing. Frozen and dry sand with a low ice content requires less energy to thaw and can remain stable under both frozen and unfrozen conditions. The ice-rich permafrost frequently found in the upper layers of permafrost requires more energy to thaw, because the heat capacity of ice is larger than that of air. The water melted from ice-rich permafrost has a smaller volume than the original ice. Thawing in such areas therefore immediately destabilizes the soil environment, a destabilization which is significantly enhanced if the melt water is drained. The ice content of the permafrost can exceed 50% by volume, in single layers up to 100%, if segregated ice has formed large lenses.



September | Zackenberg



Kan modeller forudsige at permafosten tør?

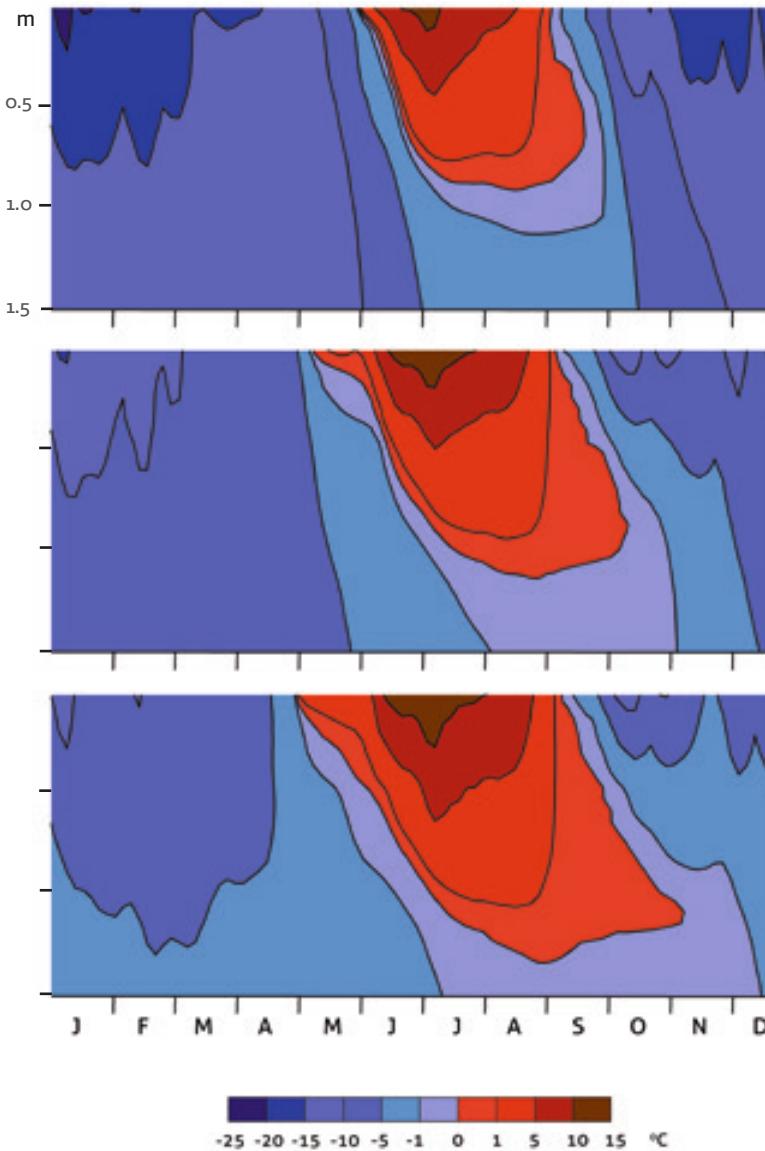
Ud over observationer og fysiske målinger bruges også modellering til at forudsige permafrostens optøning. Modelarbejdet har betydelige usikkerheder indbygget, idet modellerne kun i begrænset omfang tager højde for fx dræning, erosion, aflejringer og landskabets geomorfologi. Omvendt er modelarbejdet vigtigt for at kunne give et kvantitatitivt bud på, hvad fremtidens klimaændringer kan betyde for permafosten.

Can models predict permafrost thawing?

Besides observations and physical measurements, modelling can be used to predict thawing of permafrost. Models include considerable uncertainties though, as they can only take into account a certain extent of the effects from e.g. draining, erosion, deposition and the geomorphology of the landscape. However, models are important in order to quantify the significance of future climate change on permafrost.

Figurerne viser temperaturudviklingen i de øverste 1,5 m af en jord i en tundra i Nordøstgrønland i løbet af ét år. Den øverste figur viser observationer fra i dag. De røde nuancer viser hvordan aktivlaget udvikles i juni og når en maximal tykkelse på cirka 70 cm i starten af september. Derefter fryser aktivlaget igen både nedefra og oppefra. Den mellemste figur viser samme udvikling i jordtemperaturen, men er baseret på modelresultater, hvor den årlige middellufttemperatur er øget med 4 °C i forhold til i dag. Den nederste figur er også baseret på modelresultater, hvor den årlige middellufttemperatur er øget med 6 °C i forhold til i dag. Modelresultaterne viser, at optøningen af aktivlaget starter tidligere og slutter senere på året, samt bliver 20-70 cm tykkere end i dag. Modelresultaterne er således et bud på i hvilket omfang og hvor hurtigt den øverste del af permafosten kan tø, såfremt de regionale klimamodeller fra Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) for området holder stik. Figuren er bearbejdet af Jørgen Hollesen.

The figures show the temperature development during one year in the top 1.5 m of a tundra soil in Northeast Greenland. The top figure shows observations from today. The red shades show the development of the active layer from the onset in June until the maximum depth of about 70 cm is reached in early September. Then the active layer refreezes from both the top and bottom. The middle figure shows the same development in soil temperatures, only this time based on modelled results, where the annual average air temperatures are increased by 4 °C, as compared to today. The lower figure is based on modelled results with annual average air temperatures increased by 6 °C. Overall, these modelled results show that the thawing of the active layer starts earlier and ends later in the year and they predict that the active layer will increase with 20-70 cm, as compared to the present. The model thus presents a forecast of the potential rate and extent of the thawing of the upper permafrost layers, if the regional climate models from the Meteorological Institute of Denmark (DMI) prove to be right. The figure has been made by Jørgen Hollesen.





August | Broget dal, Strindbergs Land

Foreløbigt modelarbejde tyder på, at permafrost-temperaturer i fx Zackenberg i Nordøstgrønland 10 m under overfladen har været mellem -7 og -8 °C inden for de sidste 100 år, og at temperaturerne er steget til nutidige værdier på mellem -6 til -8 °C og vil kunne stige til mellem -2 og -3 °C allerede før år 2100.

Med udgangspunkt i aktivlagets og permafrostens termiske egenskaber, og en fremskrivning af temperatur og nedbørsforhold, kan et vand- og energiregnskab udregnes. Den svenske COUP-model er blevet kalibreret og derefter testet på kendte dataserier fra både Vest- og Østgrønland. Efter at modellen nu er valideret, kan den efterfølgende bruges i en følsomhedsanalyse, som er det bedste bud på, hvad fremtiden må bringe. I tilfældet Zackenberg viser følsomhedsanalysen (se figuren på modsatte side), at den maksimale aktivlagstykke vil stige, og at mellem 20-70 cm af den øverste del af permafrosten vil kunne tø før 2100. Analyser viser desuden, at permafrostens indhold af is og de fremtidige mængder og fordeling af sneen i landskabet er afgørende for at kunne give et mere sikkert bud på en fremtidig optøning af permafrosten.

I dag er processer omkring permafrosten ikke inkluderet i de globale klimamodeller, som ellers regnes som værende det bedste bud på fremtiden, og dermed er udgangspunktet for en række politiske diskussioner, prioriteter og beslutninger. Ved at inddrage ny viden om permafrost, forventes en mere nuanceret forståelse og mere robust fremskrivning af fremtidens klima – ikke bare i Arktis, men også globalt.

Presently, the models suggest that permafrost temperatures at 10 m below the soil surface in e.g. Zackenberg in northeast Greenland, which have been between -7 and -8 °C within the last 100 years, at present have risen to -6 to -8 °C and will potentially increase further to between -2 and -3 °C before year 2100.

Based on the thermal properties of the active layer and the permafrost, combined with a projection of temperatures and precipitation, a water- and energy budget can be calculated. The COUP model is originally Swedish and has been calibrated and validated on data series from both West and East Greenland. This makes the model appropriate for a sensitivity analysis, which is the best possible guess for future conditions. In Zackenberg, the sensitivity analysis (see figure on previous page) shows that the maximum active layer depth will increase and that 20-70 cm of the upper permafrost will potentially thaw before year 2100. Moreover, the sensitivity analyses show that the ice content of the permafrost and the future volume and distribution of snow are crucial for a more robust projection of the future permafrost thawing.

Today, permafrost processes are not included in the global climate models. These are considered to provide the current best guess of the future climate and therefore form the basis of political discussions, priorities and decisions. If we include new knowledge on permafrost, we expect a more faceted understanding and a more robust projection of the future – not just in the Arctic, but also globally.